

**MEDICIÓN DE PROPIEDADES ELÁSTICAS DE MATERIALES ISOTRÓPICOS
POR ULTRASONIDO**

**ANDRÉS FERNANDO RUIZ GIRALDO
DIEGO JAVIER TASCÓN MOSQUERA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI,
2013**

**MEDICIÓN DE PROPIEDADES ELÁSTICAS DE MATERIALES ISOTRÓPICOS
POR ULTRASONIDO**

**ANDRÉS FERNANDO RUIZ GIRALDO
DIEGO JAVIER TASCÓN MOSQUERA**

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
EDIGUER ENRIQUE FRANCO GUZMÁN
Ingeniero Mecánica y doctor en ciencias**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI,
2013**

Nota de aceptación

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Mecánico

EMERSON ESCOBAR

Jurado

JHON JAIRO CABRERA

Jurado

Santiago de Cali, 27 de febrero de 2013

AGRADECIMIENTOS

A mis queridos padres, Walter Ruiz y Bertha Giraldo, que gracias a ellos soy lo que soy hoy en día, por sus consejos y su apoyo durante todo este proceso.

A mi familia por su apoyo, mis padres Diego Javier Tascón y Martha Lucía Mosquera fueron una ayuda incondicional y mis hermanas Marcela Lucía Tascón y Verónica Tascón que siempre me acompañaron en este camino que culmina.

A Joao Luís Ealo y Jhon Pasos del Laboratorio de Vibraciones y Acústica de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, por el préstamo de los equipos para la adquisición de las señales.

A Ricardo Dorado, Gerente y propietario de Vilco, y Diego Campo, Gerente de Neón Ayala, por su colaboración en el diseño del montaje mecánico.

CONTENIDO

GLOSARIO	10
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
2. JUSTIFICACION	15
3. OBJETIVOS	16
3.1. OBJETIVO GENERAL	16
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	16
4. MARCOS DE REFERENCIA	17
4.1. ANTECEDENTES	17
4.2. MARCO TEORICO	18
4.3. TEORIA DE ELASTICIDAD (LEY DE HOOKE)	19
4.4. PROPAGACIÓN UNIDIMENSIONAL DE ONDAS ACÚSTICAS	19
4.5. ONDA LONGITUDINAL Y ONDA TRANSVERSAL	20
4.6. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS	21
4.7. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS	22
4.8. IMPEDANCIA ACÚSTICA	24
4.9. TRANSMISIÓN Y REFLEXIÓN EN INTERFACES	25
4.9.1. incidencia normal	25
4.9.2. incidencia oblicua	26
4.10. TRANSDUCTORES DE ULTRASONIDO	32
4.11. TIPOS DE TRANSDUCTORES	33
4.11.1. transductores de contacto	33
4.11.2 transductores de inmersión	33
4.11.3 transductores de focalizados	34
4.11.4 transductores de elemento dual	34
5. MONTAJE EXPERIMENTAL	35
5.1 DISEÑO DEL MONTAJE	35
5.2 ELECCIÓN Y DIMENSIÓN DE LOS MATERIALES DE PRUEBA	36

6. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	38
6.1 DETERMINACIÓN DE LOS ATRASOS DE LAS ONDAS	39
7. RESULTADOS	42
7.1 RESULTADOS DE LAS VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA	42
7.1.1 Acero	43
7.1.2 Vidrio	45
7.2 OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES ELÁSTICAS: MÓDULO DE ELASTICIDAD (E) Y MÓDULO DE POISSON (ν)	48
8. CONCLUSIONES	50
9. RECOMENDACIONES	51
BIBLIOGRAFÍA	52
ANEXOS	54

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Propiedades acústicas de algunos materiales comunes	22
Cuadro 2. Espesor y ángulo de incidencia de los materiales	42
Cuadro 3. Resultado de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales para el acero	47
Cuadro 4. Promedio y desviación estándar de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales para el acero	47
Cuadro 5. Resultado de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales para el vidrio	47
Cuadro 6. Promedio y desviación estándar de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales para el vidrio	48
Cuadro 7. Resultado experimental de las propiedades elásticas	48
Cuadro 8. Resultado del porcentaje de desviación relativa de las propiedades elásticas.	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ondas de cuerpo en sólidos	20
Figura 2. (a) esquema de la muestra en medio de los transductores usado para obtener las ecuaciones (6) y (7). (b) montaje experimental típico	23
Figura 3. Reflexión y transmisión normal de ondas planas en un límite	25
Figura 4. Onda longitudinal incide un interfaz solido- solido	27
Figura 5. Incidencia de una onda longitudinal en la interfaz definida entre un líquido no viscoso y un sólido	30
Figura 6. Coeficiente de reflexión y transmisión en la interfaz definida entre agua y acero	31
Figura 7. Coeficiente de reflexión y transmisión en la interfaz definida entre agua y vidrio	31
Figura 8. Estructura de un transductor ultrasónico del tipo usado en ensayos no destructivos	33
Figura 9. Diseño del montaje	36
Figura 10. Dimensión de las piezas para los ensayos	37
Figura 11. Dibujo esquemático del sistema experimental	38
Figura 12. Estructura del sistema experimental (Laboratorio de vibraciones y acústica, Escuela de ingeniería Mecánica, Universidad del Valle)	39
Figura 13. Ejemplo de correlación cruzada. (a) Señal de referencia; (b) Señal desconocida; (c) correlación cruzada entre (a) y (b)	41
Figura 14. Gráfica de las señales obtenidas para el ensayo con la muestra de acero	43
Figura 15. Gráfica de la envolvente para el ensayo con la muestra de acero	44
Figura 16. Gráfica de las señales obtenidas para el ensayo con la muestra de vidrio	45
Figura 17. Gráfica de la envolvente para el ensayo con la muestra de vidrio	46

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Transductores de inmersión utilizada para la medición de las propiedades elásticas	54
ANEXO B. Diseño del montaje para las pruebas por ultrasonido	54
ANEXO C. Planos para el diseño de la base	55
ANEXO D. Módulos de elasticidad y razón de Poisson de diferentes materiales	56
ANEXO E. Campo de radiación de un transductor piezoeléctrico	56
ANEXO F. Propiedades mecánicas del acero AISI 1020	57
ANEXO G. Propiedades mecánicas del vidrio	57

GLOSARIO

Envolvente: es la forma en la variación de la amplitud de onda.

Límite elástico: es el esfuerzo máximo que puede soportar un material antes de presentar deformación plástica.

Material isotrópico: son materiales que tienen las mismas propiedades en *todas* las direcciones (axiales, laterales e intermedias).

Módulo de elasticidad (E) o Módulo de Young: es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico en las primeras etapas de carga.

Módulo de Poisson (ν): es la razón entre la deformación unitaria lateral y la deformación unitaria axial.

Reverberación: es un fenómeno acústico de reflexión que se produce en un espacio, cuando el campo de onda incide contra las paredes o el suelo.

RESUMEN

Este proyecto se enfoca en la medición de las propiedades elásticas de materiales isotrópicos por medio de ensayos no destructivos (ultrasonido). En nuestro trabajo se recurrió al proceso de inmersión, el cual la pieza de ensayo estaría en contacto con el agua y para esto fue necesario el uso de transductores de inmersión.

Inicialmente se estudió la teoría de propagación de ondas, adquisición de datos y análisis de señales debido a que es un tema que actualmente es poco abordado en la universidad y es necesario para poder entender la temática del presente proyecto.

Estudiada la teoría se desarrolló el montaje mecánico del sistema con el fin de realizar las pruebas para dos (2) materiales diferentes y así poder determinar con precisión las propiedades elásticas de estos. Para la realización del montaje, se tuvieron en cuenta diferentes parámetros como el ancho de banda de los transductores, las dimensiones de los transductores, el tipo de material para la base ya que estará sumergida en agua, con el fin de evitar la oxidación.

Finalmente se estudian las señales obtenidas con el fin de realizar los cálculos necesarios para obtener las propiedades elásticas de los materiales y se compara los resultados obtenidos experimentalmente con los valores otorgados por la literatura.

INTRODUCCIÓN

La era del ultrasonido comenzó en la primera guerra mundial debido a la necesidad de detectar los submarinos. Los primeros experimentos fueron realizados por el físico francés Paul Langevin quien logró detectar la presencia de un submarino a una distancia de varios centenares de metros usando cristales de cuarzo como transductores. Más tarde se realizaron estudios sobre el uso del ultrasonido con fines médicos, principalmente en la detección de tumores y enfermedades del corazón, y posteriormente se creó el primer *scanner* para visualizar imágenes en 2D del interior del cuerpo humano. Las aplicaciones están presentes en muchas áreas de la ingeniería y ciencia en general, desde las imágenes médicas, la detección de fallas en piezas y estructuras, hasta aplicaciones en la microelectrónica y en el ámbito militar.

Los ensayos no destructivos son técnicas para analizar las propiedades físicas o la homogeneidad de un material de manera no invasiva, es decir, sin causar ningún daño a la pieza inspeccionada. Los equipos y técnicas de medición han avanzado a la par con la tecnología, siendo la electrónica y la computación las áreas que más impacto han tenido. La inspección o caracterización ultrasónica es una rama de los ensayos no destructivos de gran importancia para la industria y que siempre está en permanente innovación.

Para este tipo de ensayo no destructivo se utiliza un cristal llamado cristal piezoeléctrico, que al aplicarle un campo eléctrico se genera deformaciones al interior de este. La combinación de estos efectos es una parte fundamental para que funcione un sistema ultrasónico.

Las propiedades elásticas de los materiales son fundamentales para el diseño de piezas mecánicas. Estas propiedades definen la aplicabilidad y el rango de trabajo del material. La mayoría de materiales usados en ingeniería son isotrópicos y sus propiedades elásticas quedan totalmente determinada por dos constantes independientes, que generalmente son el módulo de elasticidad y el módulo o razón de Poisson. Por isotropía se entiende que las propiedades elásticas del material son iguales en todas las direcciones, los materiales que no cumplen esta propiedad se llaman anisotrópicos y requieren un número mayor de constantes independientes para definir sus propiedades elásticas.

En este trabajo fue implementada y analizada la técnica de caracterización ultrasónica de materiales isotrópicos. La implementación de la técnica requirió la construcción de un dispositivo mecánico para sostener los transductores y

posicionar la muestra, la cual debe girar un ángulo conocido. Además, fue necesario implementar el montaje experimental para la adquisición de los datos y su posterior procesamiento en Matlab.

Para el análisis por ultrasonido se utilizaron muestras de diferentes materiales isotrópicos, midiendo velocidades de propagación longitudinal y transversal. Con esto se buscó hallar sus propiedades elásticas (módulo de elasticidad y razón de Poisson). Estos resultados fueron comparados y discutidos con la información suministrada por la literatura.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las propiedades elásticas proporcionadas por la literatura o por los fabricantes poseen un nivel de error considerable(% error entre 0.525 y 2.63 como se puede ver en la tabla 8). Aunque en la mayoría de los casos este nivel de error no es relevante, en algunas aplicaciones, como es el caso de los materiales usados como patrón de dureza en micro y nanodurómetro, estas propiedades elásticas deben ser medidas con exactitud. Ocurre lo mismo en aplicaciones especiales, como por ejemplo en mecánica de precisión. Por otro lado, la caracterización de nuevos materiales o aleaciones, o cierto materialdel cual no se conocen sus propiedades, también es un problema frecuente en ingeniería.

El ultrasonido es una manera exacta y relativamente simple de hallar las propiedades elásticas de materiales. Sin embargo, la realización del ensayo no es trivial. Para esto se requiere del dominio de los conceptos relacionados con la propagación de ondas en sólidos, adquisición de datos, y análisis de señales. Además, la implementación de la técnica requiere un montaje mecánico que posicione los transductores y la muestra, ytambién, permita la rotación de esta última un ángulo conocido.

El ultrasonido también es la técnica más relevante para la caracterización de materiales anisotrópicos. Este tipo de materiales, que incluyen los compuestos de fibra reforzada, materiales cristalinos, entre otros, son ampliamente usados en ingeniería y la determinación de sus propiedades elásticas es mucho más complejo que en el caso de materiales isotrópicos. Sin embargo, el mismo montaje usado para medir las propiedades de materiales isotrópicos puedeser usado para este fin, solamente cambia la manera de hacer el ensayo y el procesamiento de los datos.

2. JUSTIFICACIÓN

La caracterización de materiales isotrópicos es importante debido a los aspectos mencionados en la sección anterior. El dominio de esta técnica de medición será un aporte importante a las técnicas disponibles en el Laboratorio de Mecánica de sólidos de la UAO.

El ultrasonido es una alternativa viable de implementar, para encontrar y estudiar las propiedades elásticas de los materiales isotrópicos, proporcionando unos resultados muy precisos comparados con la información suministrada en la literatura.

Entre las ventajas que se presenta al utilizar el ultrasonido en los materiales isotrópicos es que permite caracterizar materiales con grandes espesores. Otra ventaja que se presenta es que la realización de los ensayos es muy rápida, lo cual hace que el trabajo sea más eficiente.

Finalmente, el montaje mecánico, los métodos de adquisición y análisis de señales implementados, podrán servir para realizarla caracterización de materiales anisotrópicos. Para estos tipos de materiales, el procesamiento de las señales para obtener el tensor de rigidez del material es un problema complejo que se aborda numéricamente y podría ser un tema de investigación para futuros trabajos dentro de la universidad.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Implementar la técnica de medición de las propiedades elásticas de materiales isotrópicos por ultrasonido.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dominar los conceptos teóricos de propagación de ondas y adquisición y análisis de señales requeridos.
- Diseñar y construir el montaje mecánico para la sujeción de los transductores y la sujeción y rotación de la muestra.
- Seleccionar un grupo de muestras, de por lo menos dos materiales diferentes, para ser caracterizados por ultrasonido.
- Ensayar las muestras y comparar los resultados obtenidos con las propiedades proporcionadas por la literatura.

4. MARCOS DE REFERENCIA

4.1. ANTECEDENTES

El uso de las ondas acústicas de frecuencia ultrasónica comenzó en los años de la primera guerra mundial, cuando el científico francés Paul Langevin desarrolló el primer sonar para detectar submarinos. Los primeros ensayos con el sonar usaban ondas acústicas en el rango audible, sin embargo, rápidamente quedó claro que para tener mejor precisión en la localización de submarinos era necesario usar ondas de frecuencia más alta, en el rango del ultrasonido.

Entre los años 1929 a 1945 se comenzaron a realizar los primeros avances en el estudio de ultrasonido. Inicialmente fue usado para detectar objetos metálicos y más adelante se usaron dos transductores para detectar grietas en sólidos. Japón fue el primer país que incursionó en el uso del ultrasonido para fines médicos, creando aplicaciones con las cuales, por ejemplo, se podía ver el recorrido de la sangre en el cuerpo humano para investigaciones cardiovasculares. Cuando los Estados Unidos comenzaron a trabajar con ultrasonido a partir de los años 50, se crearon dispositivos capaces de detectar el cáncer de manera no invasiva, además de mejoras considerables en el tema de la visualización del flujo de la sangre. Esta tarea ya se podía realizar visualizando en tiempo real directamente en una pantalla.

Al quedar clara la versatilidad y el potencial del ultrasonido, los ingenieros comenzaron a desarrollar nuevas técnicas para realizar ensayos no destructivos (END) en materiales y piezas mecánicas. Esto con la motivación de prevenir las fallas que ocasionaban accidentes y daños en equipos. Después de la década de los 70, nuevas necesidades se fueron creando. Una de ellas era como cuantificar las fallas que se detectaban en materiales y se introdujo entonces un nuevo concepto denominado evaluación cuantitativa de ensayos no destructivos (EQND). Países como Inglaterra, Alemania y Estados Unidos trazaron el camino hacia esta nueva área de la ingeniería.

Con la creación de las computadoras y el avance de la informática el estudio del ultrasonido se mejoro considerablemente. Uno de los adelantos que se alcanzó fue el de la medición de los espesores de materiales o recubrimientos a través de técnicas de ultrasonido. En la actualidad se pueden encontrar equipos de ultrasonido para ensayos no destructivos con pantallas en LED o LCD, en las cuales se puede cambiar el contraste, el brillo, etc. También se puede variar el rango, la frecuencia, entre muchos otros parámetros que le permiten a un técnico

entrenado detectar fallas pequeñas y en piezas con geometría compleja. En la actualidad se pueden encontrar maquinas de ultrasonido que pueden detectar, caracterizar y medirlos defectos en materiales, además de medir características tales como tamaño de grano, porosidad y textura.

A medida que avanza la tecnología, las necesidades van surgiendo y también las exigencias. Los ensayos no destructivos se encaminan a seguir a la vanguardia con dichas exigencias, además de incursionar en aplicaciones para la industria, teniendo especial importancia en las industrias nuclear y aeronáutica, tanto comercial como militar.

En Colombia, el desarrollo de nuevas técnicas y equipos ultrasónicos no es un tema de investigación frecuente. Sin embargo, desde hace un tiempo algunos grupos de investigación han surgido y ya se empiezan a ver trabajos en las revistas y congresos a nivel local. Por ejemplo, existen grupos trabajando en la Universidad del Valle, la Santiago de Cali y la Universidad Santo Tomás, mostrando que el tema está despertando el interés de los investigadores.

La caracterización de las propiedades elásticas de materiales por ultrasonido es una técnica de probada exactitud y versatilidad, en el caso de los materiales isotrópicos, y es un importante campo de investigación en el caso de los materiales anisotrópicos. En la literatura pueden encontrarse trabajos recientes donde la técnica es usada para determinar el módulo de Young y el módulo de Poisson de materiales puros como cobre y aluminio con desvíos menores al 2% [4][5]. En el campo de los materiales anisotrópicos, existen muchos artículos y tesis de postgrado dedicadas al tema [1][13].

4.2. MARCO TEORICO

Actualmente el ultrasonido se utiliza como un método de prueba no destructiva con el fin de examinar y realizar mediciones a elementos para la obtención de información de sus propiedades.

En la industria se utiliza el ultrasonido para la inspección o detección de fallas y la comprobación del dimensionado en las máquinas.

4.3. TEORIA DE ELASTICIDAD (LEY DE HOOKE)

La mayoría de los materiales (como los metales, plásticos y cerámicos) tienden a comportarse elástica y linealmente en las primeras etapas de carga.

Se dice que un material es elástico-lineal cuando al aplicarse un esfuerzo y se remueve, el material recupera su forma y dimensión inicial y existe una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria. En el momento del diseño de algún elemento sometido a cargas, es importante tener en cuenta este comportamiento con el fin de evitar deformaciones permanentes debido al flujo plástico.

La relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria está dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

σ Representa el esfuerzo axial, ε es la deformación unitaria axial y E es el módulo de elasticidad (o módulo de Young) del material en estudio. La ecuación anterior es similar a la ecuación de la recta donde el módulo de elasticidad representa la pendiente de la gráfica esfuerzo-deformación unitaria. La deformación unitaria es adimensional, por consiguiente, las unidades del esfuerzo son iguales a la del módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad posee validez **solamente** cuando el material a estudiar o el elemento a diseñar, posee un comportamiento elástico-lineal. Además si el esfuerzo aplicado es mayor al límite proporcional, el diagrama de esfuerzo-deformación deja de ser una línea recta (pasando de la región elástica, a la región plástica) y la ecuación descrita anteriormente deja de ser válida.

4.4. PROPAGACIÓN UNIDIMENSIONAL DE ONDAS ACÚSTICAS

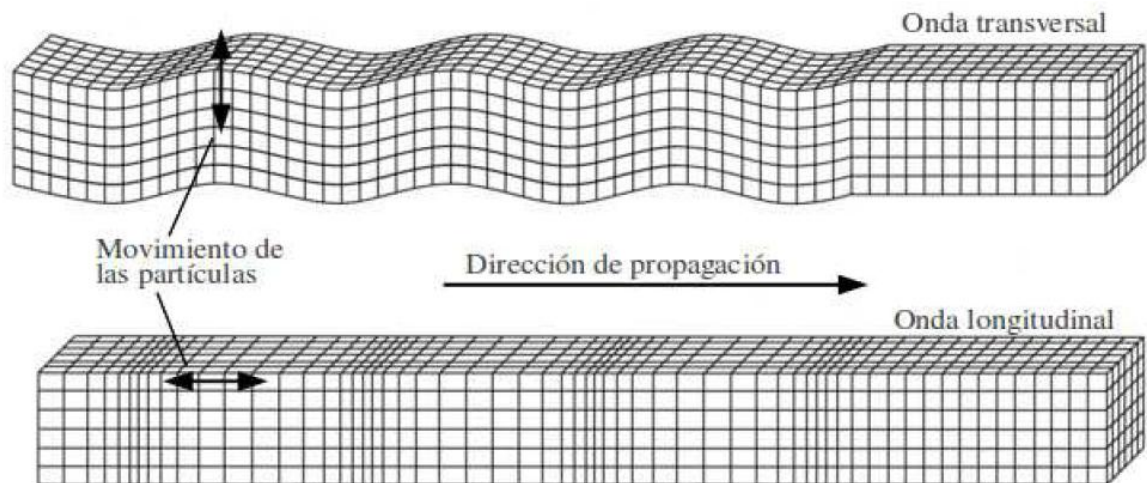
Los ensayos por ultrasonido se enfocan en la variación de la deformación de los materiales respecto al tiempo. Los materiales están compuestos de átomos, los cuales pueden ser forzados a movimientos vibratorios sobre la posición de equilibrio.

La acústica actúa sobre las partículas que contienen átomos y producen una onda mecánica al moverse en una dirección. Al material NO aplicarle un esfuerzo a tensión o compresión, mayor a su límite elástico, produce oscilaciones elásticas. Cuando se desplazan las partículas de su posición de equilibrio, aparecen las fuerzas de restauración interna (electrostática). Estas fuerzas, combinadas con la inercia del material, producen movimientos oscilatorios dentro del medio.

4.5. ONDA LONGITUDINAL Y ONDA TRANSVERSAL

Las ondas longitudinales, también llamadas de presión, son una perturbación en la tensión mecánica que se propaga en el material y donde el movimiento vibratorio de una partícula ocurre en la misma dirección de propagación. En el caso de las ondas transversales, el movimiento vibratorio de una partícula ocurre en la dirección perpendicular de propagación. Una representación esquemática de estos dos tipos de ondas se muestra en la figura 1.

Figura 1. Ondas de cuerpo en sólidos



Estas ondas tienen relación directa con las tensiones normal y transversal y su velocidad de propagación depende de las constantes elásticas del material. Para el caso de un material isotrópico y homogéneo, la propagación unidimensional de una onda acústica de cuerpo es modelada por:

$$\frac{d^2u}{dx^2} = \frac{1}{c^2} \frac{d^2u}{dt^2} \quad (2)$$

Donde u es el desplazamiento de una partícula, t es el tiempo, x es la dirección de propagación y c es la velocidad de propagación de la onda. La solución de la ecuación diferencial (2) de segundo orden es una función oscilatoria en términos de las variables independientes x y t [Kinsler, 1962]:

$$u(x, t) = x_0 e^{j(\omega t \pm kx)} \quad (3)$$

Donde x_0 es la amplitud de la onda, $k = 2\pi/\lambda$ es el número de onda, λ es la longitud de onda, $j = \sqrt{-1}$ es el operador imaginario y los signos - y + representan una onda propagándose para la izquierda y para la derecha, respectivamente. La ecuación anterior puede expresarse en términos de senos y cosenos aplicando la identidad de Euler [2].

4.6. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS

La velocidad de propagación de las ondas está relacionada con las propiedades elásticas del material. Para deducir la ecuación 1 se supone una relación tensión-deformación lineal (Ley de Hooke), esto permite obtener las siguientes ecuaciones para las velocidades de propagación longitudinal (c_p) y transversal de cizallamiento (c_s):

$$c_p = \sqrt{\frac{G(4G - E)}{\rho(3G - E)}} = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (4)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \quad (5)$$

Donde E es el módulo de Young, G es el módulo transversal o de cizallamiento, ν es el módulo de Poisson y ρ es la densidad. Se debe recordar que las propiedades elásticas de un material isotrópico son modeladas completamente por dos constantes elásticas, entonces los pares de constantes (G, E) y (E, ν) son maneras diferentes de representar las propiedades elásticas del mismo material. En general, el módulo transversal de un material es menor que el módulo de Young, las ondas longitudinales se propagan a mayor velocidad que las transversales. En la tabla 1 se muestran las propiedades acústicas de algunos de los materiales más usados en ultrasonido.

Cuadro 1. Propiedades acústicas de algunos materiales comunes

Material	ρ (kg/m ³)	C_p (m/s)	C_s (m/s)	Z_p (Mrayl)	Z_s (Mrayl)
Acero	7900	5900	3200	46,0	24,9
Aluminio	2700	6420	3040	17,33	8,21
Vidrio	2260	5640	3280	13,1	7,62
Agua	1000	1480	-	1,48	-
Aire	1,24	344	-	0,00043	-

Fuente: Kino G.S. *Acoustic waves: devices, imaging and analog signal processing*. Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1987.

Resolviendo las ecuaciones 4 y 5 para c_p y c_s , se obtienen las propiedades elásticas (módulo de elasticidad y módulo de Poisson) del material en función de las velocidades de las ondas longitudinal y transversal:

$$\nu = \frac{c_p^2 - 2c_s^2}{2(c_p^2 - c_s^2)} \quad (6)$$

$$E = c_s^2 \cdot 2\rho(1 + \nu) \quad (7)$$

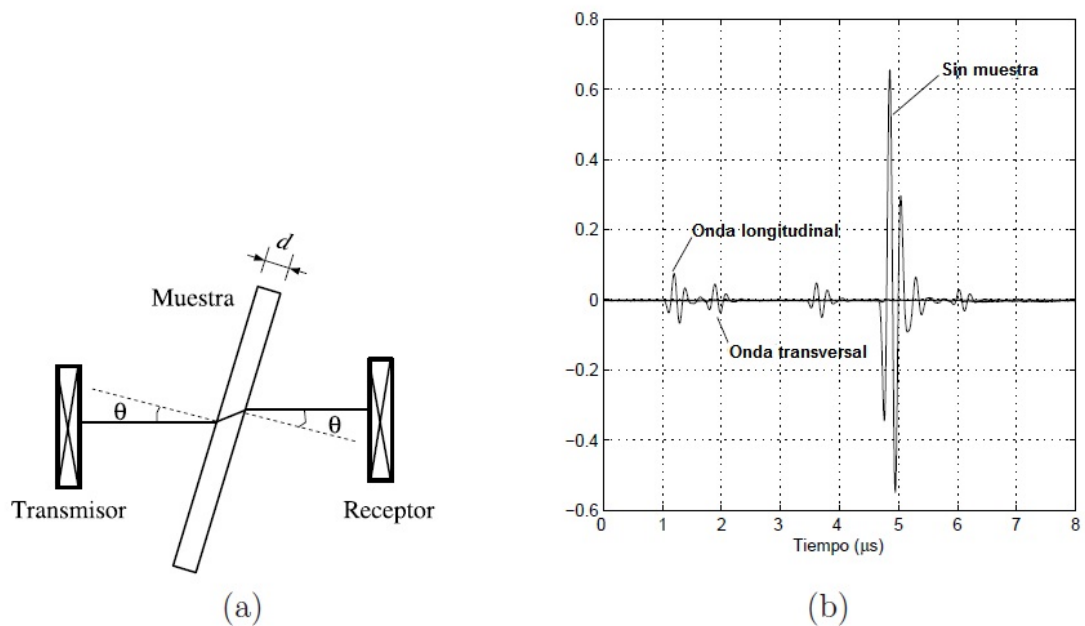
4.7. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS

En la figura 2 (a) se muestra un esquema del montaje típico utilizado para la medición del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. La técnica usa dos transductores de ondas longitudinales dispuestos coaxialmente e inmersos en agua; uno, funciona como transmisor y, el otro, como receptor. La muestra de espesor, d , se coloca entre los transductores y comparando el tiempo que transcurre entre las ondas; en los casos con y sin muestra, se obtiene la velocidad de propagación dentro del material.

En el caso en que la incidencia de la onda sobre la muestra sea normal, una parte de la onda longitudinal que viaja en el agua es reflejada y la otra atraviesa la muestra y llega hasta el receptor; cuando la incidencia es oblicua, se produce el fenómeno denominado conversión de modo, que consiste en que una parte de la onda longitudinal se convierte en transversal y si el ángulo de incidencia es mayor que un valor determinado, llamado ángulo crítico (θ_c), dentro de la muestra solamente se propaga onda transversal. Esa onda transversal se convierte

nuevamente en longitudinal en la superficie opuesta de la muestra y se propaga en el agua hasta llegar al receptor. El valor del ángulo crítico puede ser estimado por medio de la ley de Snell. De esa forma, la conversión de modo hace posible la medición de la velocidad de propagación de los dos tipos de onda. En el trabajo de Franco (Acoustic transmission with mode conversion phenomenon, Noviembre del 2005) se encuentra un estudio más detallado del fenómeno.

Figura 2. (a) esquema de la muestra en medio de los transductores usado para obtener las ecuaciones (6) y (7). (b) montaje experimental típico



Fuente: Franco E.E, Adamowski J.C, and Buiochi F. Measurement of elastic properties of materials by the ultrasonic through-transmission technique. *Revista Dyna*, 168:59-64, August 2011.

En la figura 2(b) se muestra un esquema de tres ondas típicas obtenidas en ensayos de ultrasonido: la onda longitudinal viajando en el fluido (generalmente agua), la onda longitudinal obtenida al interponer la muestra perpendicularmente a los sensores (incidencia normal $\theta = 0$) y la onda transversal que se propaga en la muestra al ser rotada hasta un ángulo mayor al primer ángulo crítico (incidencia oblicua $\theta > 0$).

Si t_1 y t_2 son los tiempos de de transito de las ondas en los casos sin y con muestra, respectivamente, a partir de la geometría mostrada en la figura 2(a), para incidencia normal ($\theta = 0$), la velocidad de propagación de la onda longitudinal dentro del material esta dada por:

$$c_p = \frac{c_w}{1 + \frac{c_w(t_2 - t_1)}{d}} \quad (8)$$

Donde c_w es la velocidad de propagación de la onda longitudinal en el agua y d es el espesor de la muestra. En el caso de la onda transversal, la muestra es rotada un ángulo mayor al ángulo crítico y el tiempo de llegada es t_3 , en este caso la velocidad está dada por:

$$c_s = \frac{c_w}{\sqrt{(\sin \theta)^2 + \left[\frac{c_w(t_3 - t_1)}{d} + \cos \theta \right]^2}} \quad (9)$$

4.8. IMPEDANCIA ACÚSTICA

El sonido viaja a través de los materiales bajo la influencia de la presión acústica. Las moléculas o átomos de un sólido al estar ligados elásticamente el uno al otro, la presión excesiva resulta en una propagación de onda a través del sólido[11]. La impedancia acústica (Z) está definida como la razón entre la tensión y la velocidad de la partícula y es la propiedad acústica más importante. La impedancia acústica representa la facilidad que posee un material para transmitir la vibración acústica. Para una onda plana propagándose para el frente (en el sentido positivo de las x) en un medio perfectamente elástico, la impedancia acústica está dada por:

$$z = \rho c \quad (10)$$

Donde ρ es la densidad y c es la velocidad acústica.

El concepto de impedancia acústica es análogo al concepto de impedancia eléctrica de la teoría electromagnética. Las unidades de la impedancia acústica en el sistema internacional son $N.s/m^3$, esta unidad es llamada “rayl”.

La impedancia acústica es importante para:

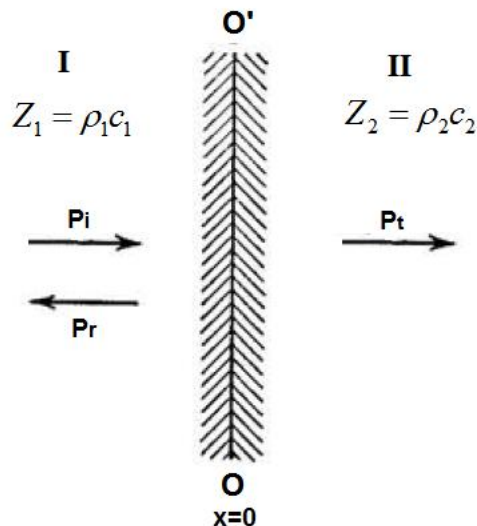
- La determinación de la transmisión acústica y la reflexión en el límite de dos materiales con impedancia acústica diferente.
- El diseño de transductores ultrasónicos.
- Evaluar la absorción del sonido en un medio.

En general, la impedancia acústica es una cantidad compleja, donde la parte imaginaria modela la atenuación de la onda, es decir mide la pérdida de potencia mientras se desplaza.

4.9. TRANSMISIÓN Y REFLEXIÓN EN INTERFACES

4.9.1. Incidencia normal. Cuando una onda plana progresiva en un medio fluido incide en el límite de un segundo medio contiguo, una onda reflejada es generada sobre el primer medio y una onda transmitida es generada en el segundo medio. La relación de las respectivas intensidades y de las amplitudes de presión de las ondas reflejadas y transmitidas a los de la onda incidente depende de las impedancias de los dos medios y en el ángulo de incidencia de la onda incidente.

Figura 3. Reflexión y transmisión normal de ondas planas en un límite



Fuente: Kinsler L.E, Frey A.R. *Fundamentals of Acoustics*. Second Edition. John Wiley & Sons. Inc. New York, USA, 1962.

Si Z_1 Y Z_2 son las impedancias acústicas de los medios I y II, respectivamente, los coeficientes de reflexión y transmisión están dados por las siguientes expresiones:

$$R = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (11)$$

$$T = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (12)$$

De las ecuaciones anteriores se puede concluir que si la onda incide en una interfaz rígida, es decir, la impedancia acústica del segundo medio es muy alta comparada con la del primer medio, $R=1$, por lo tanto, la onda es totalmente reflejada sin cambio de fase. Por otro lado, si la onda incide en el espacio libre, vacío o en la práctica el aire, $R= -1$ y la onda se refleja totalmente con un cambio de fase de 180° . En el caso más general, R y T son cantidades complejas.

Despejando Z_2 de la expresión del coeficiente de reflexión, se tiene:

$$Z_2 = Z_1 \frac{1+R}{1-R} \quad (13)$$

De donde se puede concluir que midiendo el coeficiente de reflexión se puede determinar la impedancia acústica del segundo medio, suponiendo que se conocen las propiedades del primer medio. Este resultado es el principio que usan varias técnicas para la caracterización de materiales, especialmente fluidos.

4.9.2. Incidencia oblicua. Las ondas ultrasónicas transmitidas o reflejadas a través de interfaces dependen de *la velocidad de propagación acústica entre el material, la geometría del transductor y el ángulo de incidencia en las interfaces.*

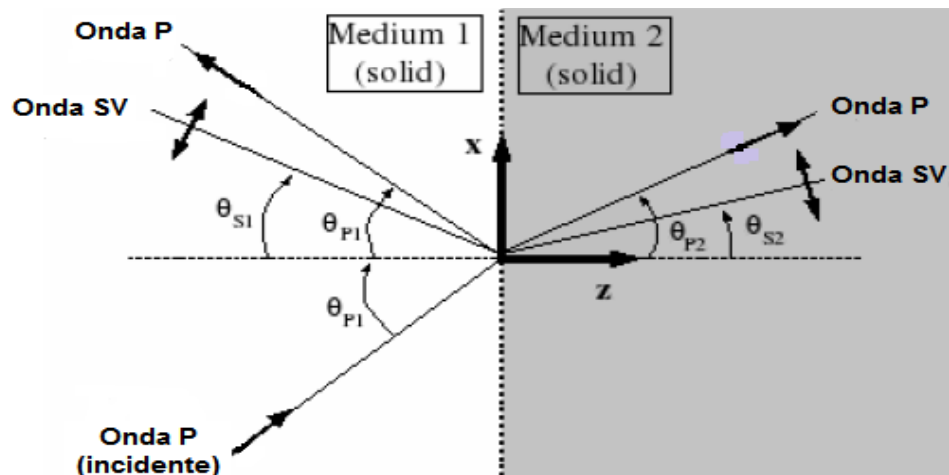
La propagación de onda en un medio sólido es más complejo que en un medio líquido ya que ambas ondas (longitudinal y transversal) pueden propagarse simultáneamente en sólidos. Al haber ambos tipos de ondas, el análisis de las señales se vuelve complicado y es necesario eliminar los modos de propagación indeseados.

El ángulo de incidencia es el ángulo entre la dirección de propagación de la onda y el vector normal de la superficie reflejada. Cuando hay una incidencia normal en la superficie, las ondas transmitidas y reflejadas son del mismo tipo de onda incidente. Al variar el ángulo de incidencia, otro tipo de onda aparece y este tipo de fenómeno se conoce como **conversión de modo**.

Durante el proceso de transmisión o reflexión, la amplitud y fase de onda se vuelven diferentes y sucede el cambio o conversión de modo; es decir pasa de ser una onda longitudinal a una onda transversal y viceversa, dependiendo de las características de la impedancia acústica del medio, el ángulo de incidencia y el tipo de onda incidente (longitudinal o transversal).

Como se muestra en la figura 4, en sólidos puede existir la presencia de tres tipos de ondas: onda longitudinal (P), una onda cortante vertical (SV) y una onda cortante horizontal (SH). La onda SH es perpendicular al plano XZ. El desplazamiento de las partículas en ambas ondas cortantes es perpendicular, por lo tanto sus polarizaciones son diferentes.

Figura 4. Onda longitudinal incide un interfaz solido- solido



Fuente: Franco E.E, Andrade M.A.B, Higuti R.T, Adamowski J.C, and Buiochi F. Acoustic transmission with mode conversion phenomenon. In *Proceeding of the 18th International Congress of Mechanical Engineering*, page Paper ID 1183, Ouropreto – MG, Brazil, November 9-13 2005.

Considerando que una onda longitudinal incide en un interfaz solido-solido, la onda incidente genera onda reflejada y onda transmitida (como se muestra en la

figura 4). Los ángulos reflejado y refractado se calculan por medio de la **Ley de Snell** (la cual proporciona información sobre la dirección de propagación y se aplica indistintamente para ondas longitudinales o transversales).

A continuación se presenta la matriz que relaciona los coeficientes de reflexión (R_p) y transmisión (T_p) de la onda longitudinal y los coeficientes de reflexión (R_s) y transmisión (T_s) de la onda transversal. Este modelo es válido solamente para una onda longitudinal incidente.

$$\begin{bmatrix} \frac{\rho_1 \sin \theta_{p1}}{\rho_1 c_{p1}} & \frac{\cos \theta_{s1}}{\rho_1 c_{s1}} & \frac{-\rho_2 \sin \theta_{p2}}{\rho_2 c_{p2}} & \frac{-\rho_2 \sin \theta_{s2}}{\rho_2 c_{s2}} \\ \frac{\cos \theta_{p1}}{\rho_1 c_{p1}} & \frac{-\sin \theta_{s1}}{\rho_1 c_{s1}} & \frac{\cos \theta_{p2}}{\rho_2 c_{p2}} & \frac{\sin \theta_{s2}}{\rho_2 c_{s2}} \\ -\cos(2\theta_{s1}) & \sin(2\theta_{s1}) & \cos(2\theta_{s2}) & \sin(2\theta_{s2}) \\ \frac{\sin(2\theta_{p1})}{c_{p1}^2/c_{s1}^2} & \cos(2\theta_{s1}) & \frac{\sin(2\theta_{p2})}{c_{p2}^2/c_{s2}^2} & -\cos(2\theta_{s2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_p \\ R_s \\ T_p \\ T_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-\rho_1 \sin \theta_{p1}}{\rho_1 c_{p1}} \\ \frac{\cos \theta_{p1}}{\rho_1 c_{p1}} \\ \cos(2\theta_{s1}) \\ \frac{\sin(2\theta_{p1})}{c_{p1}^2/c_{s1}^2} \end{bmatrix}$$

Donde ρ_1 y ρ_2 son las densidades del medio 1 y 2 respectivamente; $\theta_{p1}, \theta_{p2}, \theta_{s1}$ y θ_{s2} son los ángulos entre el vector normal de la superficie y la dirección de propagación de la onda longitudinal y cortante (P y SV); c_{p1}, c_{p2}, c_{s1} y c_{s2} son las velocidades de fase (velocidades de propagación) de la onda longitudinal y cortante en sus respectivos medios. Para un ángulo de incidencia (θ_{p1}) se puede obtener los coeficientes de la amplitud de reflexión y transmisión.

Por medio de la ecuación 14 se puede calcular la potencia de transmisión y los coeficientes de reflexión:

$$R_p^{pot} = -R_p R_p^* ; R_s^{pot} = -R_s R_s^* \frac{\text{real}(1/Z_{s1}^*)}{\text{real}(1/Z_{p1}^*)} ; T_p^{pot} = T_p T_p^* \frac{\text{real}(1/Z_{p2}^*)}{\text{real}(1/Z_{p1}^*)} ; R_s^{pot} = -T_s T_s^* \frac{\text{real}(1/Z_{s2}^*)}{\text{real}(1/Z_{p1}^*)} \quad (14)$$

Donde el asterisco en superíndice (*) representa el valor conjugado de las variables complejas, y el real () la componente real de la impedancia que se describe en la ecuación 15:

$$Z_{P1} = \frac{c_{P1}\rho_1}{\cos(\theta_{P1})} ; Z_{P2} = \frac{c_{P2}\rho_2}{\cos(\theta_{P2})} ; Z_{S1} = \frac{c_{S1}\rho_1}{\cos(\theta_{S1})} ; Z_{S2} = \frac{c_{S2}\rho_2}{\cos(\theta_{S2})} \quad (15)$$

Como se mencionó anteriormente, los ángulos de reflexión y refracción se obtienen por medio de la ley de Snell:

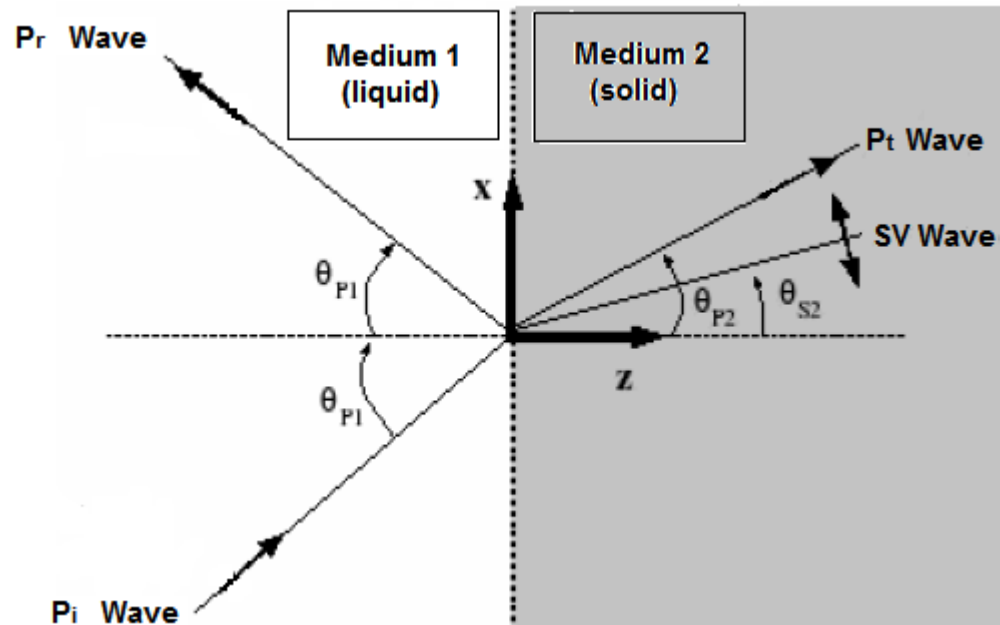
$$\frac{\sin(\theta_{P1})}{c_{P1}} = \frac{\sin(\theta_{P2})}{c_{P2}} = \frac{\sin(\theta_{S1})}{c_{S1}} = \frac{\sin(\theta_{S2})}{c_{S2}} \quad (16)$$

La matriz presentada puede usarse en una interfaz liquido-sólido, considerando una velocidad de fase compleja para una onda cortante en el líquido, como se muestra en la ecuación 17:

$$c_{complex} = \sqrt{\frac{j\omega\eta}{\rho}} \quad (17)$$

Donde ω Es la frecuencia angular de la onda, η es la viscosidad del medio y ρ es la densidad del medio.

Figura 5. Incidencia de una onda longitudinal en la interfaz definida entre un líquido no viscoso y un sólido



Fuente: Franco E.E, Andrade M.A.B, Higuti R.T, Adamowski J.C, and Buiochi F. Acoustic transmission with mode conversion phenomenon. In *Proceeding of the 18th International Congress of Mechanical Engineering*, page Paper ID 1183, Ouropreto – MG, Brazil, November 9-13 2005.

En general, las ondas cortantes no pueden propagarse en líquidos. Cuando la onda longitudinal incide en la interfaz líquido-sólido, tres tipos de onda son generadas: la onda longitudinal reflejada (P_r) con mismo ángulo de la onda incidente (onda P_i), la onda longitudinal transmitida (onda P_t) y la onda cortante (SV), como se muestra en la figura 5.

Figura 6. Coeficiente de reflexión y transmisión en la interfaz definida entre agua y acero

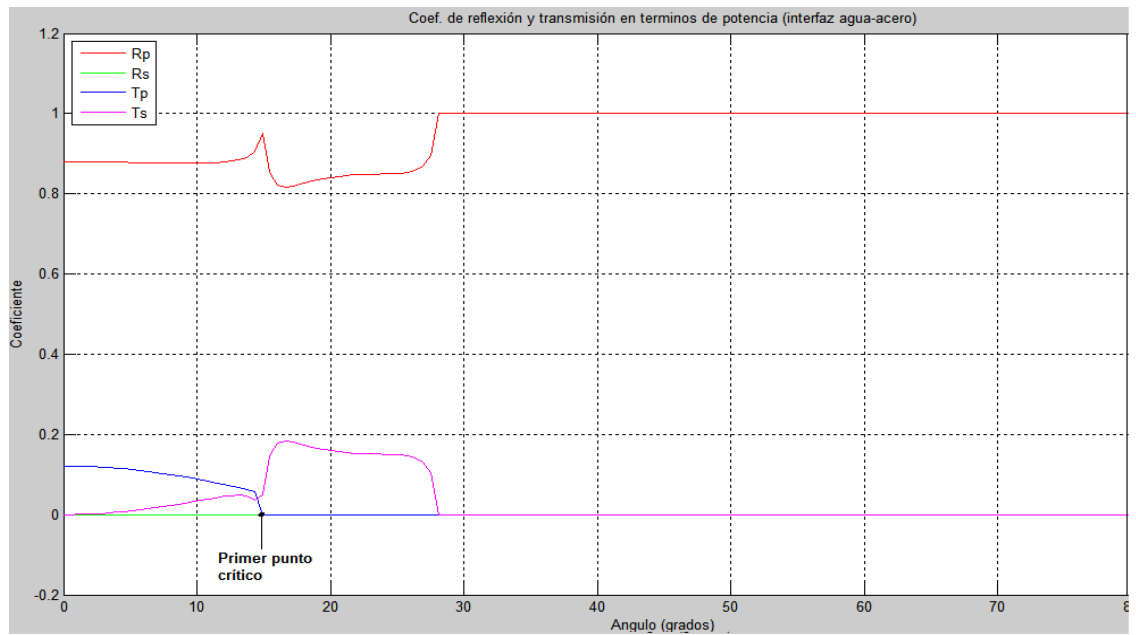
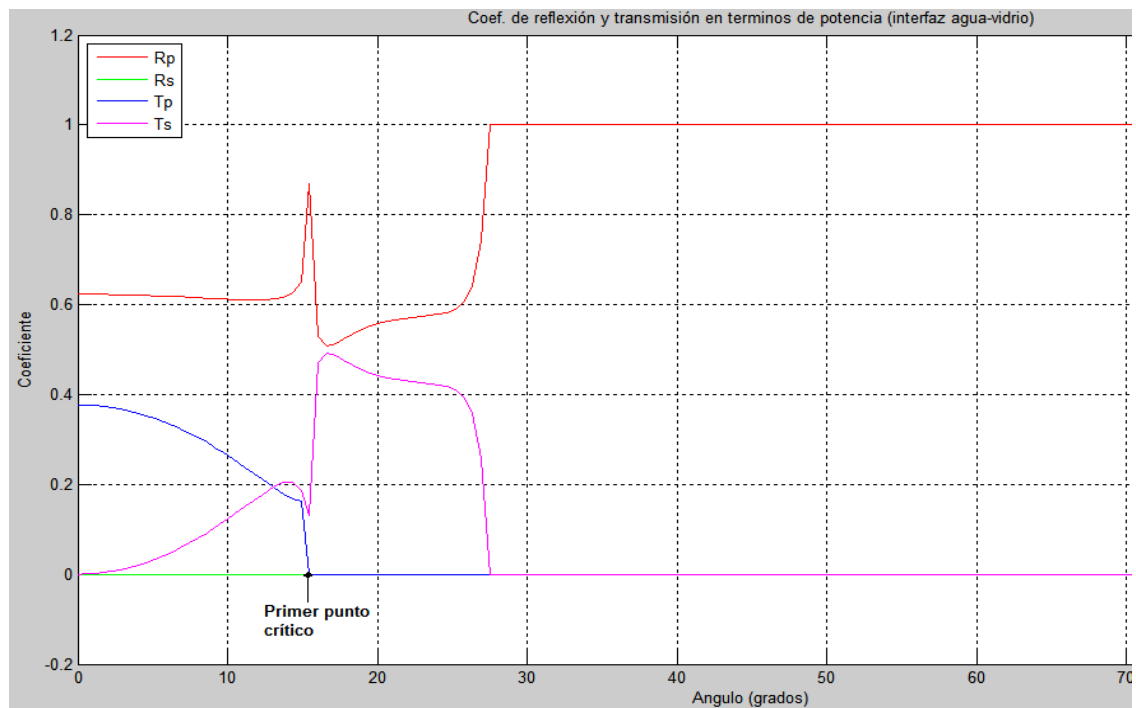


Figura 7. Coeficiente de reflexión y transmisión en la interfaz definida entre agua y vidrio



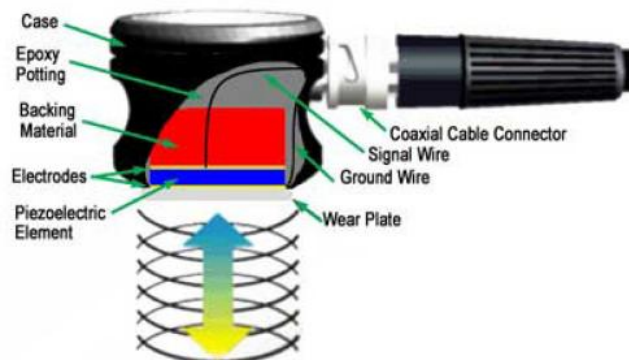
Como se mencionó en la sección 5.7.2, cuando cambia el ángulo de incidencia ocurre el fenómeno de conversión de modo, donde un tipo de onda se convierte en otro, por ejemplo, una onda longitudinal se convierte en transversal. La figura 6 muestra los coeficientes de reflexión, en función del ángulo de incidencia, de las ondas transmitidas y reflejadas por la interfaz agua-acero para una onda longitudinal incidente. Se puede ver que cuando la onda incide sobre la pieza a cero (0°) grados, solamente se transite onda longitudinal (TP). Al rotar la muestra, la onda longitudinal (TP) empieza a desaparecer y la onda transversal (Ts) se empieza a generar. En el punto crítico la onda longitudinal colapsa y únicamente hay presencia de onda transversal en el sólido. Esto muestra teóricamente que los ángulos de incidencia usados para los ensayos están por encima del primer ángulo crítico. La figura 7 muestra la misma información para la interfaz agua-vidrio.

En las figuras 6 y 7 también puede verse que sin importar el ángulo de incidencia, la amplitud de la onda transversal reflejada (modelada por el coeficiente de reflexión R_s) es cero. Esto concuerda con la regla general de que los líquidos no pueden propagar ondas transversales. También se puede ver que existe un segundo ángulo crítico, por encima del cual también la onda transversal colapsa y la totalidad de la onda incidente es reflejada.

4.10. TRANSDUCTORES DE ULTRASONIDO

El transductor es un dispositivo encargado de generar y recibir ondas acústicas. Es un elemento importante en el sistema de implementación de cualquier sistema de medición por ultrasonido. El transductor posee un elemento piezoeléctrico que convierte las señales eléctricas en vibraciones mecánicas (modo de transmisión) y vibraciones mecánicas en señales eléctricas (modo de recepción). Algunos factores como el material, su construcción mecánica y eléctrica y las condiciones de carga externa, influyen en su comportamiento.

Figura 8. Estructura de un transductor ultrasónico del tipo usado en ensayos no destructivos



Fuente: NonDestructive Testing (NTD) Resource Center. [consultado 3 de enero de 2013] disponible en internet: http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_ut_index.htm

Los transductores de ultrasonido se consiguen comercialmente o son fabricados a la medida. Empresas como Panametrics, subsidiaria de Olympus, Krautkramer, subsidiaria de General Electric, son los principales fabricantes de estos dispositivos a nivel mundial.

4.11.TIPOS DE TRANSDUCTORES

Los transductores son fabricados dependiendo de la aplicación a realizar. Es importante elegir el transductor adecuado para cada aplicación. Las características más importantes, relevantes en casi todos los casos, son el tipo de onda, la frecuencia de operación, el ancho de banda y la geometría de la superficie irradiante.

Entre los diferentes tipos de transductores ultrasónicos se destacan los siguientes:

4.11.1.Transductores de contacto. Estos transductores se utilizan para la inspección por contacto directo. Poseen una carcasa robusta para resistir el contacto al momento de deslizarse sobre el material en estudio. Requieren algunos materiales de acoplamiento (como agua, grasa o aceite) para eliminar el vacío o capa de aire entre el transductor y el elemento en estudio.

4.11.2.Transductores de inmersión. A diferencia del transductor de contacto, el transductor de inmersión no hace contacto con el componente. Estos transductores son diseñados para operar en un medio líquido. Poseen una

adaptación de impedancia que ayuda a conseguir mayor cantidad de energía acústica dentro del agua, y por consiguiente, dentro del elemento en estudio.

4.11.3. Transductores focalizados. Los transductores focalizados usan un lente acústico, que funciona de forma análoga a un lente óptico, para concentrar o dispersar las ondas. Existen dos tipos de focalización dependiendo del tipo de pieza que se quiere inspeccionar, que son el enfoque cilíndrico y el enfoque esférico. Estos transductores pueden mejorar la sensibilidad y la resolución axial concentrando la energía del sonido en un área pequeña.

4.11.4. Transductores de elemento dual. Este tipo de transductor contiene dos elementos independientes, uno de ellos emite y el otro recibe. Los transductores de elemento dual son muy útiles cuando se hacen mediciones de espesores de materiales delgados y para inspeccionar defectos en superficies.

5. MONTAJE EXPERIMENTAL

5.1.DISEÑO DEL MONTAJE

La estructura experimental está compuesta por dos transductores de inmersión con frecuencia de 5MHz y están ubicados en cada lado de la muestra y concéntricos. El transductor de transmisión tiene un diámetro de foco o radiación de $\frac{1}{2}$ pulgada (12.7 mm) y el transductor de recepción tiene un diámetro de 24 mm.

Hay que resaltar la importancia del posicionamiento de los transductores porque:

- Deben estar concéntricos para máxima transmisión de la energía. Un pequeño desvío ocasiona una caída drástica en la amplitud de la onda recibida.
- No pueden moverse durante el ensayo. Esto ocasionaría errores grandes en la medición.

En este trabajo se diseñó y fabricó el montaje experimental, que consiste en un dispositivo mecánico que permite sujetar y rotar la muestra un ángulo conocido. Como se observa en la figura 9 se construyó una base de lámina inoxidable con 2 agujeros para introducir los transductores, un transportador de acero inoxidable, una pieza de aluminio que sostiene la muestra en estudio y un mecanismo que ayuda a rotar la muestra y medir el ángulo de giro. Los transductores fueron sujetos por medio de 2 bujes plásticos con rosca.

Como el ensayo se debe realizar en inmersión, el montaje completo fue integrado en un tanque de acrílico que se puede llenar de agua, de tal manera que los transductores y la muestra quedan completamente sumergidos.

Figura 9. Diseño del montaje



- A. Transductores
- B. Base de lamina inoxidable
- C. Pieza de sostenimiento y rotación de la muestra
- D. Bujes plásticos
- E. Tanque de acrílico
- F. Muestra
- G. Transportador en acero inoxidable

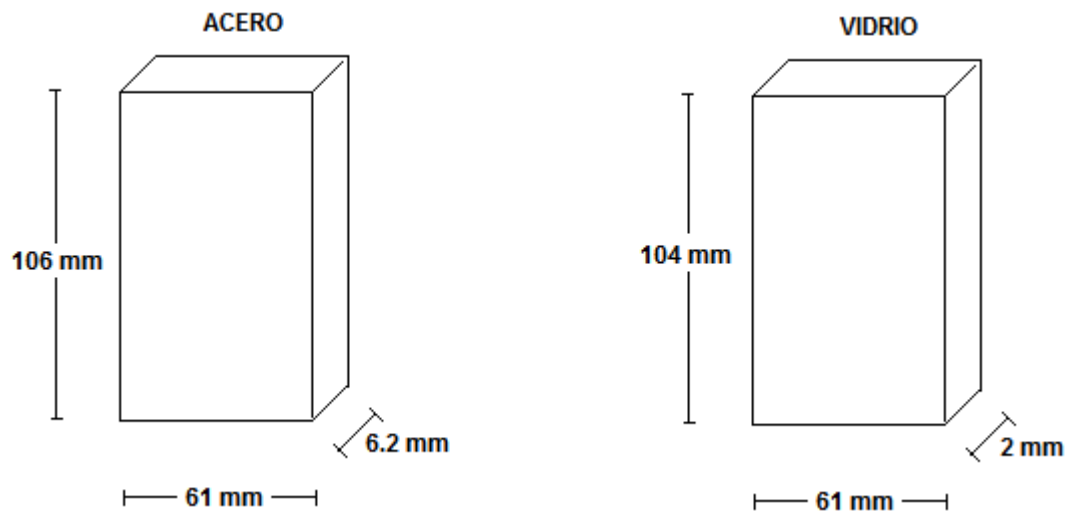
Todas las piezas mecánicas fueron diseñadas usando el software AutoCAD(Ver anexos B y C). El maquinado de las piezas fue encargado a las empresas **Corteaceros S.A., Metalmecánica industrial Suárez SAS y Vilco de Colombia S.A.S.**

Es importante anotar que este montaje mecánico no tiene que transmitir potencia y que todas sus partes están sometidas a fuerzas muy pequeñas, por tanto, análisis de resistencia de materiales no fueron necesarios.

5.2. ELECCIÓN Y DIMENSIÓN DE LOS MATERIALES DE PRUEBA

Para las pruebas por ultrasonido, no hay unas normas establecidas en el dimensionamiento de las piezas. Lo único que interesa es el espesor del material y que la onda pase a través de la pieza. Para nuestro trabajo utilizamos dos diferentes materiales: un metal (acero 1020) y una cerámica (vidrio).

Figura 10. Dimensión de las piezas para los ensayos

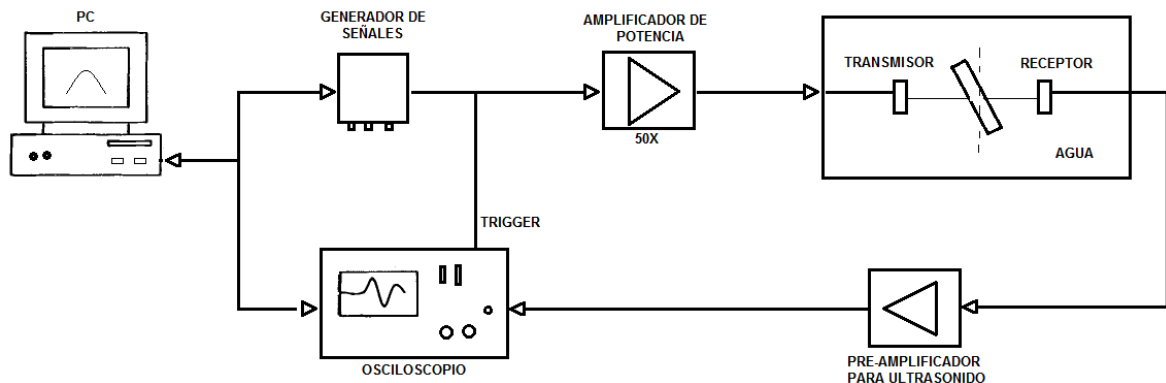


Las muestras deben ser planas, con dos caras paralelas y del tamaño suficiente para abarcar todo el haz acústico. La muestra de acero fue cortada de una chapa de $\frac{1}{4}$ de pulgada y fueron mantenidas las caras originales de la chapa. La muestra de vidrio fue cortada de una lamina de 2 mm de espesor. La figura 10 muestra la geometría de las muestras fabricadas.

6. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

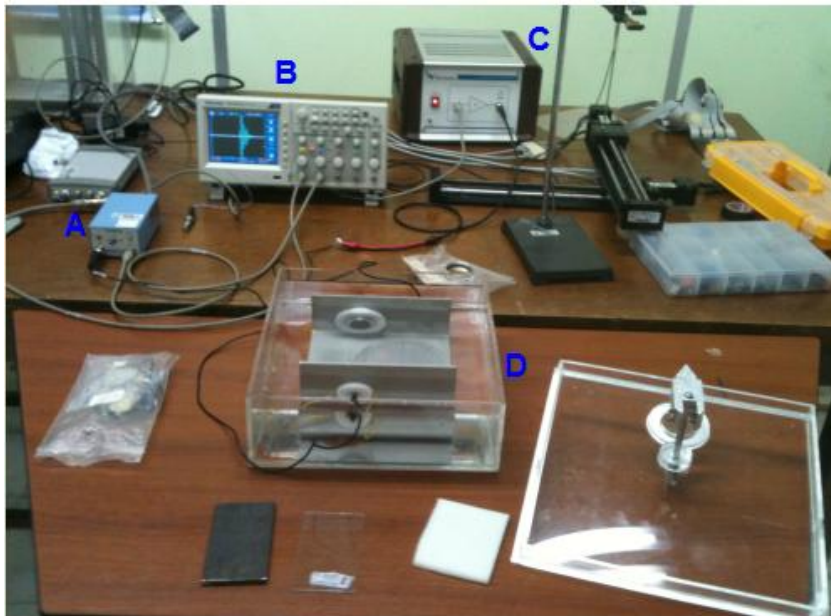
La figura 11 muestra un esquema del montaje experimental. El funcionamiento es el siguiente: el generador de señales genera un pulso rectangular sintonizado con la frecuencia del transductor. Este pulso de 2 Vpp (voltios pico a pico) es amplificado 50 veces por un amplificador de instrumentación especial, obteniendo a la salida un pulso de 100 Vpp que excita el emisor. La onda acústica se propaga desde el emisor hasta el receptor, donde es recibida y, debido a su baja amplitud (algunos milivoltios), amplificada por un pre-amplificador especial para señales ultrasónicas. La señal amplificada pasa al osciloscopio donde es visualizada y digitalizada. La adquisición es sincronizada por medio de la señal de trigger disponible en el generador de señales. El osciloscopio y el generador son controlados por medio de un computador vía puerto USB (Universal Serial Bus). La señal obtenida se digitaliza por medio del osciloscopio y es enviada al computador donde por medio del software de Matlab se pueden desarrollar los cálculos y obtener los análisis y resultados experimentales.

Figura 11. Dibujo esquemático del sistema experimental



Para realizar las mediciones se toman tres señales diferentes. Primero se excita la señal ultrasónica a través del agua SIN NINGUNA muestra y se obtiene la señal de referencia. En segundo lugar, se toma la señal con la muestra sin rotación para calcular la velocidad de propagación de la onda longitudinal. Finalmente se gira la muestra un ángulo mayor al ángulo crítico con el fin de obtener la velocidad de propagación de la onda cortante (el ángulo de incidencia es diferente para todos los materiales y se puede hallar usando el modelo descrito en la sección 5.7.2).

Figura 12. Estructura del sistema experimental (Laboratorio de vibraciones y acústica, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle)



A. Pre-amplificador de ultrasonido.

B. Osciloscopio.

C. Amplificador de Potencia.

D. Montaje de Medición.

6.1.DETERMINACIÓN DE LOS ATRASOS DE LAS ONDAS

Para determinar el tiempo de atraso relativo, es decir, la diferencia de tiempo de llegada entre dos señales, se utilizaron dos métodos: **envolvente y correlación cruzada**. Para determinar las velocidades se toma la señal de referencia y se compara con las señales obtenidas de la onda longitudinal y onda transversal. **La envolvente** de una señal se puede obtener a través de la transformada de Hilbert.

La envolvente $e(t)$ se determina por medio de la siguiente expresión:

$$e(t) = |g(t) + j\hat{g}(t)| \quad (18)$$

Donde $g(t)$ es la señal a analizar y $\hat{g}(t)$ es la transformada de Hilbert de $g(t)$.

La señal analítica es una señal compleja cuyo espectro de frecuencias es nulo para frecuencias negativas, y la parte real es igual a la señal original [12].

La transformada de Hilbert se obtiene de la siguiente manera:

$$\hat{g}(t) = g(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(\tau)}{t - \tau} d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(t - \tau)}{\tau} d\tau \quad (19)$$

La transformada de Hilbert de $g(t)$ es la convolución de $g(t)$ con la señal $\frac{1}{\pi t}$.

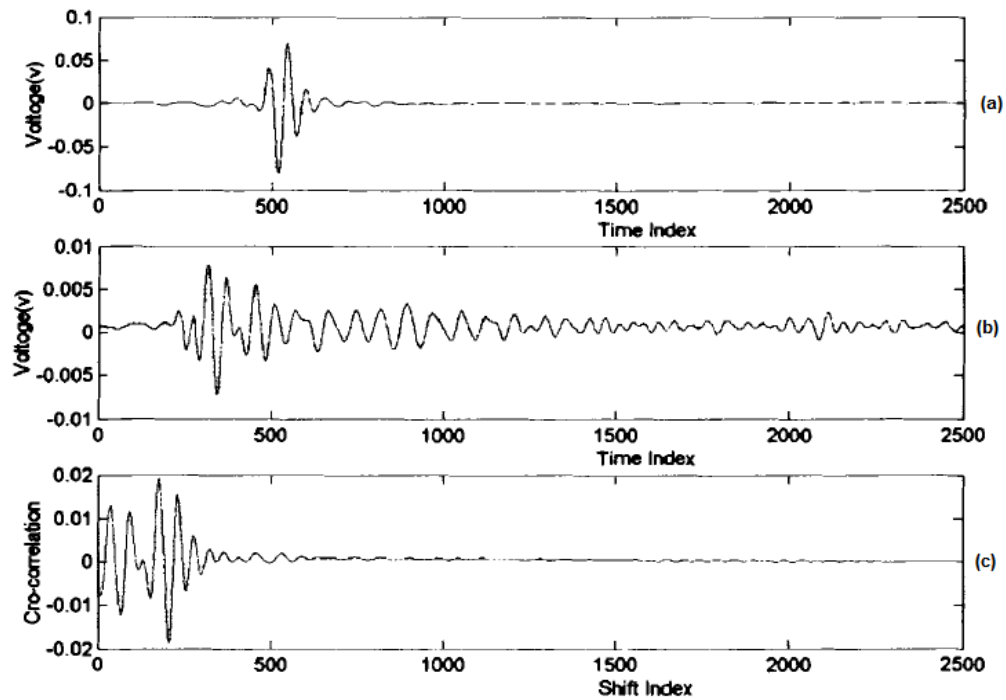
En Matlab, se calcula la señal analítica por medio del comando *Hilbert*.

La correlación cruzada entre dos señales se define por:

$$r_{xy}(\tau) = \sum_{N=-\infty}^{+\infty} x(n)y(n-\tau) \quad (20)$$

Se asumen dos señales en el dominio real $x(n)$ y $y(n)$. (τ) Es el parámetro de tiempo de retraso, xy indica la señal usada en la correlación cruzada. La correlación cruzada genera una nueva señal que tiene su valor máximo a un tiempo igual al atraso entre las dos señales analizadas.

Figura 13. Ejemplo de correlación cruzada. (a) Señal de referencia;(b) Señal desconocida; (c) correlación cruzada entre (a) y (b)



Fuente: Sun M. *Optimal recovery of elastic properties for anisotropic materials through ultrasonic measurements*. PhD thesis, The University of Maine, 2002.

7. RESULTADOS

7.1.RESULTADO DE LAS VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA

Se realizaron tres diferentes ensayos para cada material, con el fin de obtener el promedio y la desviación estándar en las velocidades de propagación de la onda longitudinal y transversal, para obtener un valor más representativo de las propiedades elásticas del material que se está evaluando.

La velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales se calculó por medio de las ecuaciones 8 y 9 descritas anteriormente en este trabajo. Los valores t_1 , t_2 y t_3 representan respectivamente, los tiempos de llegada de las señales de referencia (sin muestra), con muestra e incidencia normal (rotación de cero grados) y con muestra e incidencia oblicua (rotación con un ángulo mayor al ángulo crítico). Los tiempos se obtienen a través del programa de Matlab y se muestran específicamente en las figuras 15 y 17.

El valor de la velocidad de propagación en el agua (C_w) tiene un valor aproximado de 1480 m/s.

Cuadro 2. Espesor y ángulo de incidencia de los materiales

MATERIAL	Espesor (d)	Ángulo de incidencia (θ)
ACERO	6.2 mm	18°
VIDRIO	2.0 mm	20°

El espesor y el ángulo de rotación de cada muestra se muestran en la tabla 2. Los ángulos de rotación fueron seleccionados según los resultados teóricos mostrados en la sección 5.7.2. Estos ángulos mostraron coherencia con las observaciones experimentales. En los ensayos se pudo constatar en el osciloscopio la desaparición de la onda longitudinal y la aparición de la onda transversal, aproximadamente al ángulo crítico calculado.

7.1.1.Acero

Figura 14. Gráfica de las señales obtenidas para el ensayo con la muestra de acero

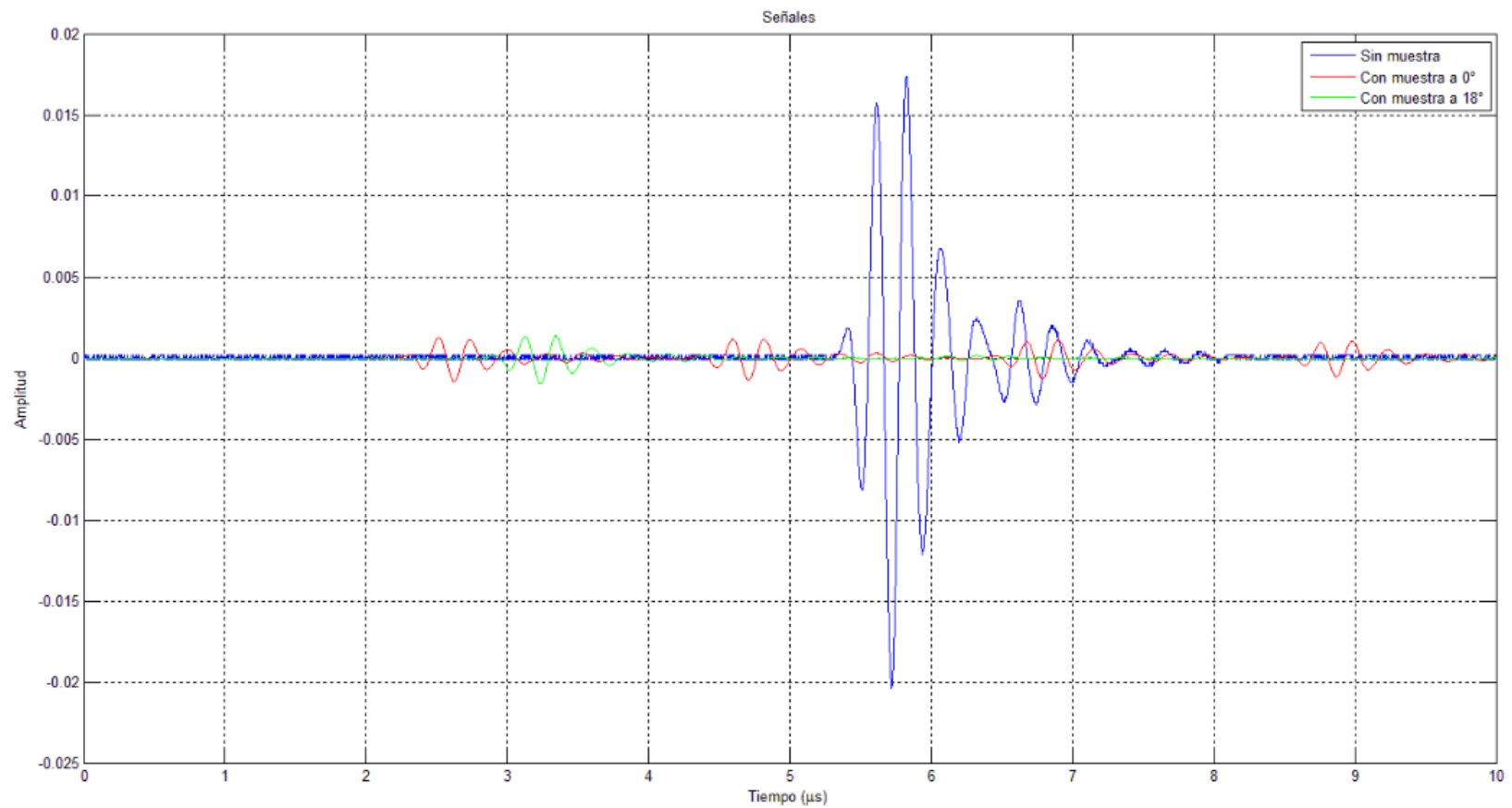
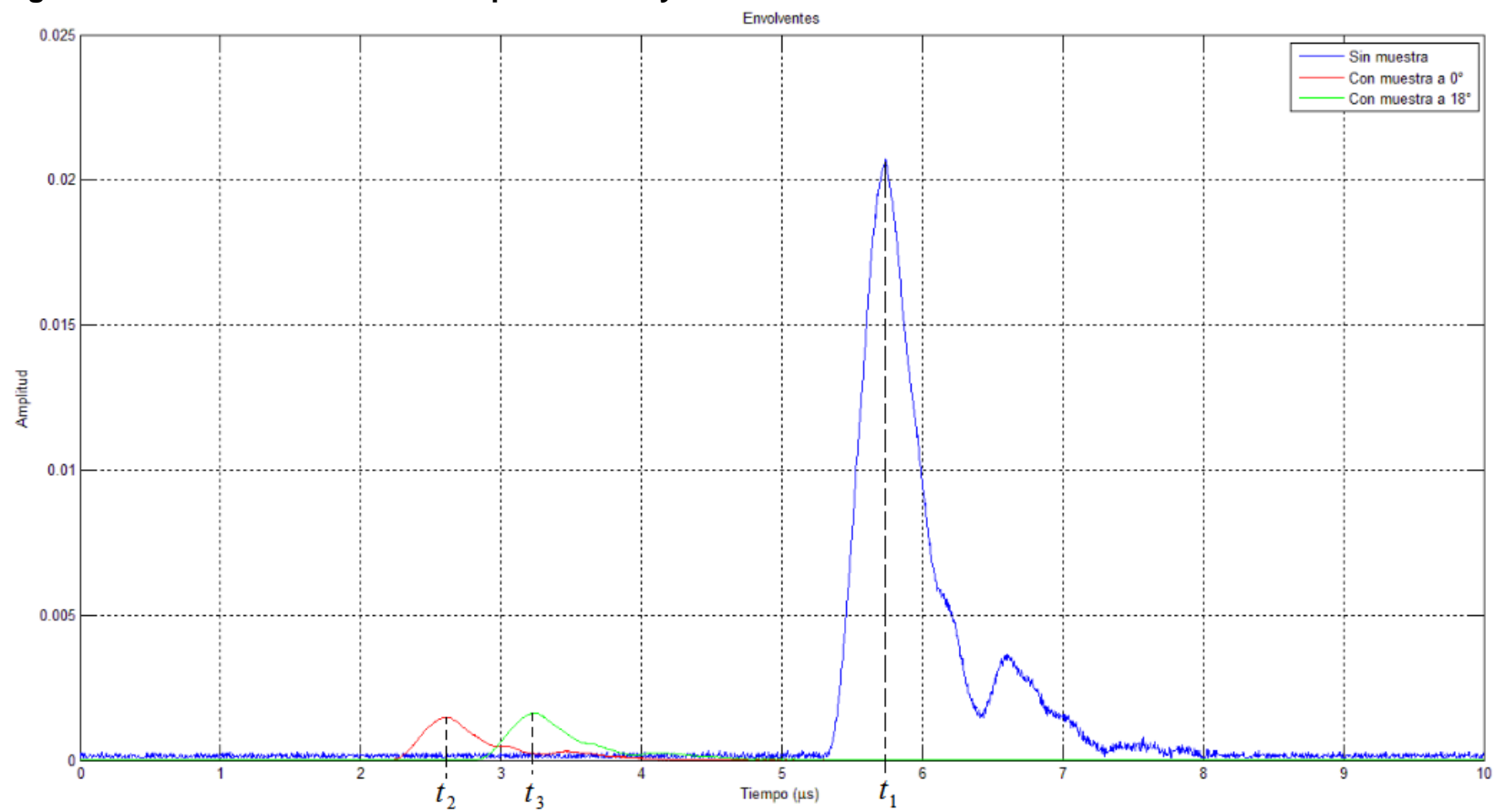


Figura 15. Gráfica de la envolvente para el ensayo con la muestra de acero



7.1.2. Vidrio

Figura 16. Gráfica de las señales obtenidas para el ensayo con la muestra de vidrio

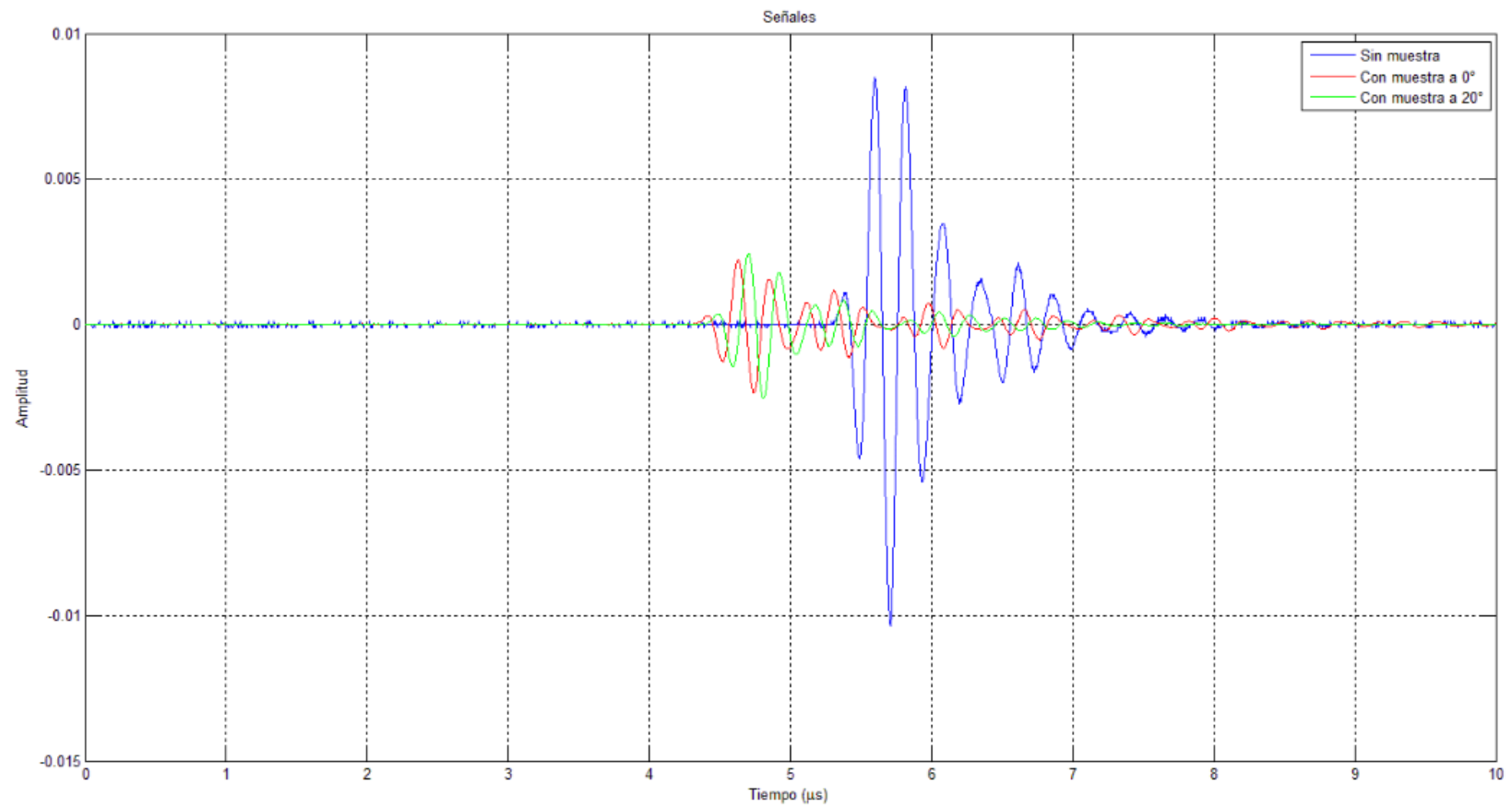
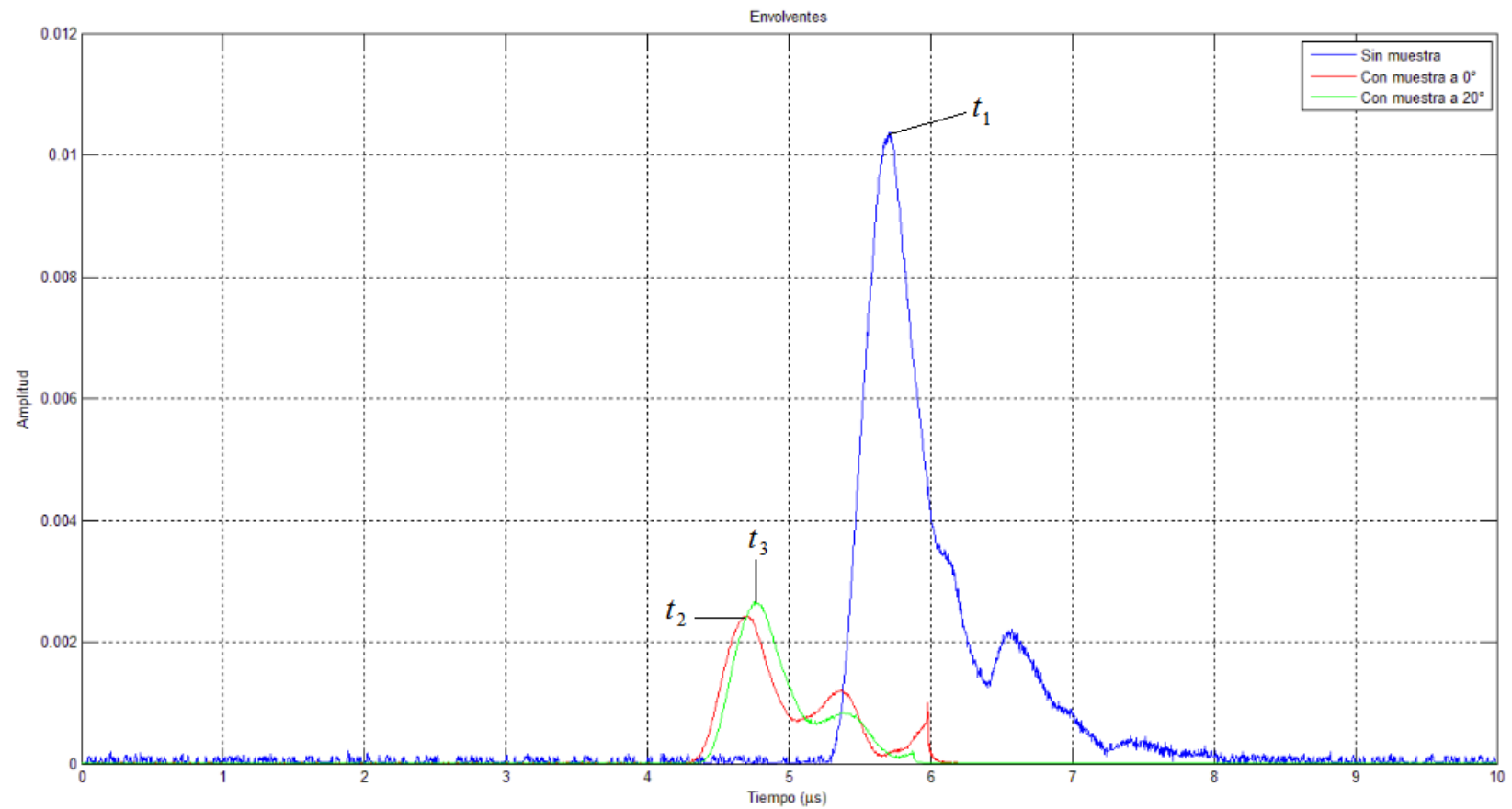


Figura 17. Gráfica de la envolvente para el ensayo con la muestra de vidrio



Las figuras 14 y 16 muestran el tiempo de las señales obtenidas (para cada ensayo) por el osciloscopio cuando la onda ultrasónica pasa a través del material. A las figuras nombradas anteriormente, se aplica la envolvente(ver sección 7.1) por Matlab, a través del comando Hilbert donde se puede observar el resultado en las figuras 15 y 17. Los picos representan los tiempos de llegada para cada señal descrita anteriormente.

Cuadro 3. Resultado de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales para el acero

ACERO	$t_1 (\mu s)$ (sin muestra)	$t_2 (\mu s)$ (0°)	$t_3 (\mu s)$ (18°)	$C_p (m/s)$	$C_s (m/s)$
Primer ensayo	5,814	2,665	3,221	5960.45	3262.65
Segundo ensayo	5,738	2,613	3,241	5826.03	3144.55
Tercer ensayo	5,698	2,601	3,249	5676.67	3087.48

Cuadro 4. Promedio y desviación estándar de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales para el acero

$C_p (m/s)$	$C_s (m/s)$	% Desviación estándar C_p	% Desviación estándar C_s
5821.05±141,95	3164.89 ± 89,34	2,43	2,82

Cuadro 5. Resultado de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales para el vidrio

VIDRIO	$t_1 (\mu s)$ (sin muestra)	$t_2 (\mu s)$ (0°)	$t_3 (\mu s)$ (20°)	$C_p (m/s)$	$C_s (m/s)$
Primer ensayo	5,706	4,702	4,758	5757.86	3551.05
Segundo ensayo	5,642	4,682	4,762	5110.5	3307.68
Tercer ensayo	5,65	4,654	4,746	5628.23	3392.91

Cuadro 6. Promedio y desviación estándar de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales para el vidrio

$C_p (m/s)$	$C_s (m/s)$	% Desviación estándar C_p	% Desviación estándar C_s
$5498.86 \pm 342,52$	$3417.21 \pm 123,49$	6,23	3,61

De acuerdo a los valores obtenidos en los cuadros 4 y 6, se puede concluir que el porcentaje de desviación estándar respecto al promedio es muy pequeño para cada muestra, proporcionando la precisión que hay por el método de ultrasonido, para hallar las velocidades de propagación de las ondas longitudinales y transversales.

7.2. OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES ELÁSTICAS: MÓDULO DE ELASTICIDAD (E) Y MÓDULO DE POISSON (ν)

Con los promedios calculados anteriormente de las velocidades de propagación de las ondas longitudinales y transversales para cada material, se procedió a calcular el valor de las propiedades elásticas de los materiales que se estudiaron en este trabajo. Por medio de las ecuaciones 6 y 7 calculamos el módulo de Poisson y el módulo de elasticidad, que son mostrados en el cuadro 7. La densidad de los materiales fue obtenida de la literatura.

Cuadro 7. Resultado experimental de las propiedades elásticas

MATERIAL	$\rho(kg/m^3)$	E (GPa)	ν	%Desviación con respecto al promedio E	% Desviación con respecto al promedio ν
ACERO	7780	$201,05 \pm 11,31$	$0,29 \pm 0,015$	5.62	5.17
VIDRIO	2500	$69,18 \pm 5,05$	$0,185 \pm 0,036$	7.29	19.45

Para hallar la desviación relativaporcentual utilizamos la siguiente ecuación:

$$\%Error = \left| \frac{X_{LIT} - X_{EXP}}{X_{LIT}} \right| * 100 \quad (21)$$

Donde X_{LIT} es el valor otorgado por la literatura del material y X_{EXP} es el valor obtenido experimentalmente.

Cuadro 8. Resultado del porcentaje de desviación relativa de las propiedades elásticas

MATERIAL	E_{LIT} (GPa)	ν_{LIT}	E_{EXP} (GPa)	ν_{EXP}	% <i>Desviacion relativa E</i>	% <i>Desviación relativa ν</i>
ACERO	200	0.29	201.05	0.29	0.525	0
VIDRIO	68	0.19	69.18	0.185	1.74	2.63

El cuadro 7 muestra que las desviaciones porcentuales con respecto a la media de los módulos elásticos y de Poisson para el vidrio son 7,29% y 19,45%, respectivamente. Esto muestra que la dispersión de los resultados es mayor en el caso del módulo de Poisson, debido a que esta cantidad es muy sensible a pequeñas desviaciones en la razón de las velocidades de propagación (cp/cs). Sin embargo, los resultados del cuadro 8 muestran una desviación pequeña del promedio con respecto al valor teórico proporcionado por la literatura. Esto muestra que si bien los resultados son dispersos, el promedio de varias mediciones llevan a valores muy cercanos a los teóricos, es decir, la precisión de la técnica no es muy buena, pero su exactitud si lo es.

8. CONCLUSIONES

- En este trabajo se implementó la técnica de medición ultrasónica de propiedades elásticas de materiales isotrópicos. Fue construido un dispositivo mecánico para el posicionamiento de los transductores y la muestra, y se implementaron los programas en Matlab que obtienen las propiedades físicas a partir de las señales acústicas digitalizadas. La adquisición de los datos se realizó en el Laboratorio de Vibraciones y Acústica de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle.
- Los resultados para dos muestras de acero y de vidrio mostraron coherencia con los valores de velocidad de propagación longitudinal y transversal y las propiedades elásticas proporcionadas por la literatura. Desviaciones relativas porcentuales hasta 2.63 % muestran que el método de medición es muy preciso.
- Al existir otras técnicas aplicadas en el estudio de materiales para la obtención de sus propiedades mecánicas, podemos garantizar que las técnicas de ultrasonido son un instrumento importante para la obtención de propiedades elásticas. Encontrar las propiedades mecánicas de los materiales isotrópicos por ultrasonido es un método viable de ser utilizado en el campo de la educación y la industria al ser muy práctico y confiable en sus resultados.
- Los ensayos por ultrasonido son una aplicación favorable en el campo de investigación de los materiales, ya que al existir la necesidad de estudiar un material desconocido, se toma una muestra con un determinado espesor, se evalúan las señales ultrasónicas y obtenido los valores de las velocidades de onda, se pueden calcular dos propiedades fundamentales (Módulo elástico y Módulo de Poisson) para conocer el tipo de material que se está estudiando.
- Finalmente, refinando el dispositivo mecánico, para realizar medidas en muchos ángulos diferentes de manera automática, el método puede extenderse a materiales anisotrópicos, especialmente materiales compuestos que tienen gran aplicación industrial y su caracterización elástica es difícil.

9. RECOMENDACIONES

- En la industria hay gran variedad de transductores, con diferentes valores de frecuencia. Dependiendo del proceso seleccionado, se debe escoger el transductor adecuado. Se recomienda disponer de un conjunto de transductores de diferentes frecuencias para tener un mayor margen de medición.
- Al hacer pruebas por el método de inmersión, la posición de los transductores debe ser la adecuada (concéntricas) para evitar errores en la toma de las señales ultrasónicas. Además la muestra debe estar bien sujeta y perfectamente paralela a la superficie de los transductores. Por tanto, el montaje mecánico requiere de algunos ajustes en caso de trabajos futuros.
- Un trabajo futuro muy interesante es la medición de las propiedades elásticas de materiales anisotrópicos por ultrasonido. Esta técnica puede implementarse realizando algunas modificaciones en el montaje experimental existente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Adamowski J.C, Andrade M.A.B, Franco E.E, and Buiochi F. Ultrasonic through-transmission characterization of fiber reinforced composites using a large aperture receiver. In *Proceedings of the International Congress on Ultrasonics 2007*, Volume Session S15: Ultrasonics of fiber reinforced composite materials, page Paper ID 1183, Vienna, Austria, April 9-13 2008.
- [2] Cheeke J.D.N, *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. CRC press, USA, 2002.
- [3] Franco E.E, Andrade M.A.B, Higuti R.T, Adamowski J.C, and Buiochi F. Acoustic transmission with mode conversion phenomenon. In *Proceeding of the 18th International Congress of Mechanical Engineering*, page Paper ID 1183, Ouropreto – MG, Brazil, November 9-13 2005.
- [4] Franco E.E, Adamowski J.C, and Buiochi F. Measurement of elastic properties of materials by the ultrasonic through-transmission technique. *Revista Dyna*, 168:59-64, August 2011.
- [5] Franco E.E, Adamowski J.C, and Buiochi F. Medición del módulo de elasticidad en materiales de ingeniería utilizando las técnicas de indentación instrumentada y de ultrasonido. *Revista de Metalurgia*, 44(1):52-65, 2008.
- [6] Gere J, Timoshenko S. *Mecánica de materiales*. Cuarta Edición. Thomson editores.
- [7] Hernández F.E, Gutiérrez M. Enfoques del análisis de envolvente al procesamiento de vibraciones para el diagnóstico de maquinarias. *Revista de Ingeniería Mecánica*, 13(1):31-40, 2010.
- [8] Kino G.S. *Acoustic waves: devices, imaging and analog signal processing*. Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1987.
- [9] Kinsler L.E, Frey A.R. *Fundamentals of Acoustics*. Second Edition. John Wiley & Sons. Inc. New York, USA, 1962.

[10] Kschischang Frank R. The Hilbert Transform [en linea]. Universidad de Toronto 2006. [Consultado 17 de Enero de 2013]. Disponible en internet: <http://web.eecs.utk.edu/~roberts/ECE342/hilbert.pdf>

[11] NonDestructive Testing (NTD) Resource Center. Pagina creada por profesionales en evaluaciones no destructivas y educadores alrededor del mundo. Patrocinada por la Iowa StateUniversity [consultado 3 de enero de 2013] disponible en internet: http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_ut_index.htm

[12] Ramírez R.I, Montejo L.A. Transformada de Hilbert, Descomposición modal empírica y sus aplicaciones en el análisis de vibraciones libres. *Revista de Int. De Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil* Vol. 11(2).

[13] Sun M. *Optimal recovery of elastic properties for anisotropic materials through ultrasonic measurements*. PhD thesis, The University of Maine, 2002.

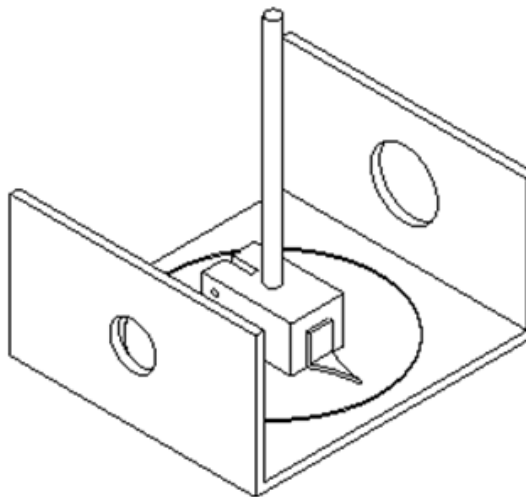
[14] Wu J. Determination of velocity and attenuation of shear waves using ultrasonic spectroscopy. *Journal of theAcousticalSociety of America*, 99(5):2871-2875, 1996.

ANEXOS

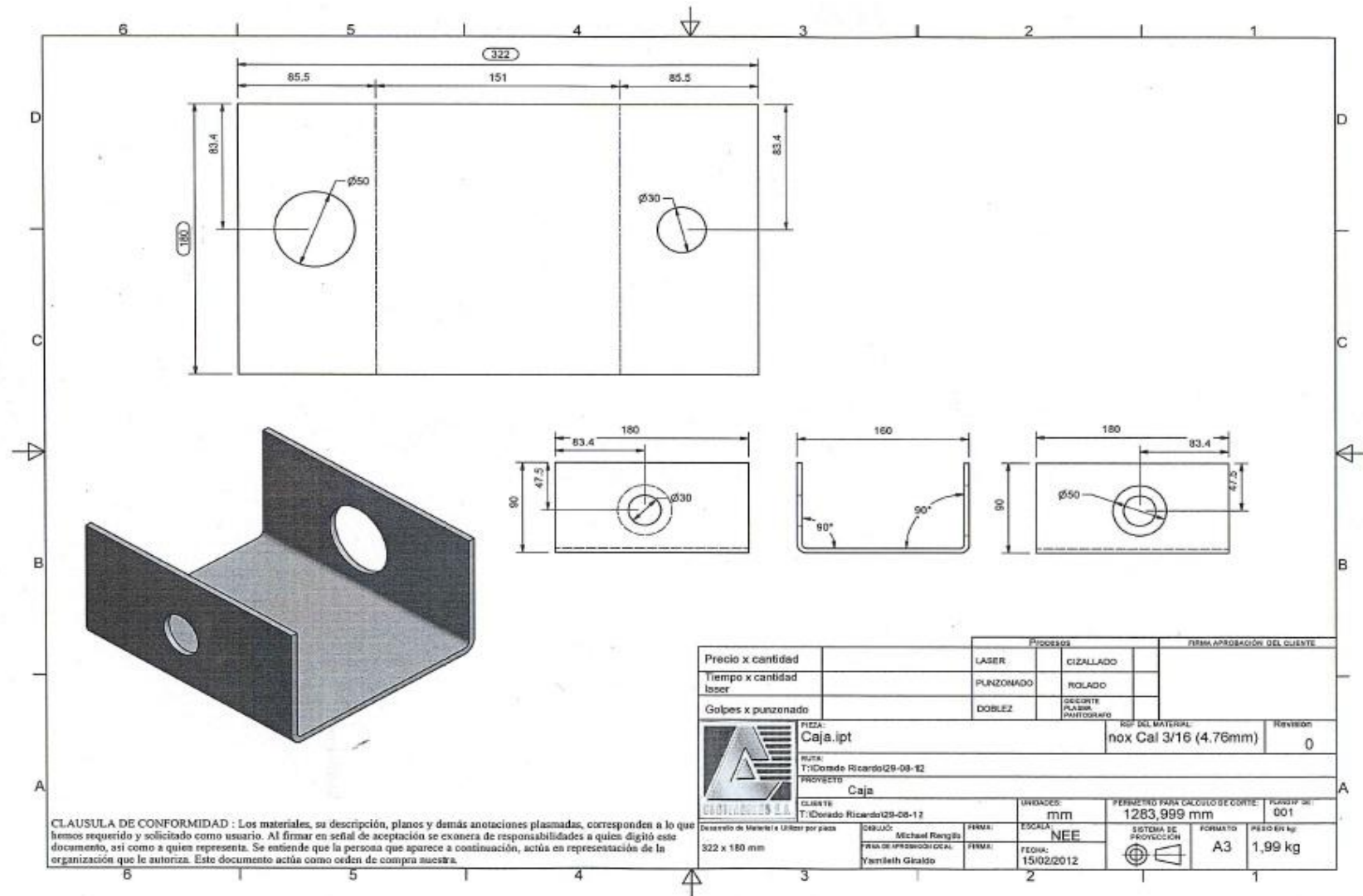
ANEXO A. Transductores de inmersión utilizada para la medición de las propiedades elásticas.



ANEXO B. Diseño del montaje para las pruebas por ultrasonido.



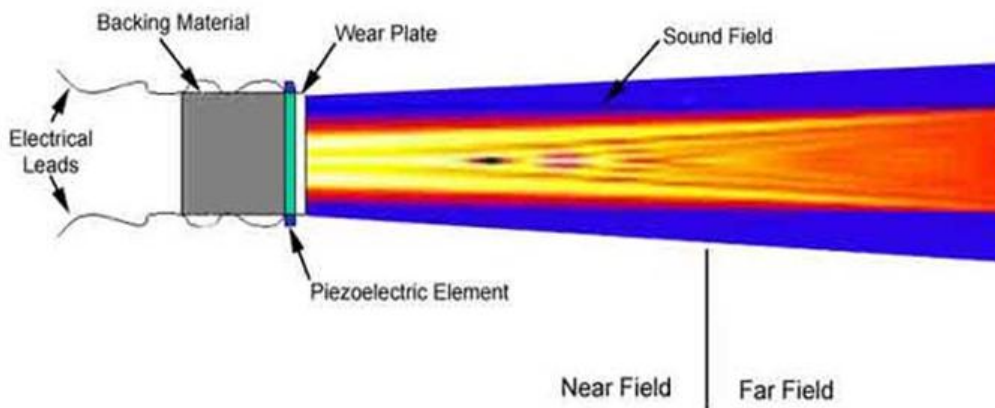
ANEXO C. Planos para el diseño de la base.




ANEXO D. Módulos de elasticidad y razón de Poisson de diferentes materiales [6].

Material	Módulo de elasticidad E		Módulo de elasticidad cortante G		Razón de Poisson ν
	ksi	GPa	ksi	GPa	
Aleaciones de aluminio	10 000–11 400	70–79	3800–4300	26–30	0.33
2014-T6	10 600	73	4000	28	0.33
6061-T6	10 000	70	3800	26	0.33
7075-T6	10 400	72	3900	27	0.33
Latón	14 000–16 000	96–110	5200–6000	36–41	0.34
Bronce	14 000–17 000	96–120	5200–6300	36–44	0.34
Hierro fundido	12 000–25 000	83–170	4600–10 000	32–69	0.2–0.3
Concreto (compresión)	2500–4500	17–31			0.1–0.2
Cobre y aleaciones de cobre	16 000–18 000	110–120	5800–6800	40–47	0.33–0.36
Vidrio	7000–12 000	48–83	2700–5100	19–35	0.17–0.27
Aleaciones de magnesio	6000–6500	41–45	2200–2400	15–17	0.35
Monel (67% Ni, 30% Cu)	25 000	170	9500	66	0.32
Níquel	30 000	210	11 400	80	0.31
Plásticos					
Nylon	300–500	2.1–3.4			0.4
Polietileno	100–200	0.7–1.4			0.4
Piedra (compresión)					
Granito, mármol, cuarzo	6000–14 000	40–100			0.2–0.3
Piedra caliza, arenisca	3000–10 000	20–70			0.2–0.3
Hule	0.1–0.6	0.0007–0.004	0.03–0.2	0.0002–0.001	0.45–0.50
Acero	28 000–30 000	190–210	10 800–11 800	75–80	0.27–0.30
Aleaciones de titanio	15 000–17 000	100–120	5600–6400	39–44	0.33
Tungsteno	50 000–55 000	340–380	21 000–23 000	140–160	0.2
Madera (flexión)					
Pino Douglas	1600–1900	11–13			
Roble	1600–1800	11–12			
Pino del sur	1600–2000	11–14			

ANEXO E. Campo de radiación de un transductor piezoeléctrico [11].



ANEXO F. Propiedades mecánicas del acero AISI 1020.

AISI 1020 Steel, normalized at 870°C (1600°F)		
Mechanical Properties	Metric	English
Hardness, Brinell	131	131
Hardness, Knoop	150	150
Hardness, Rockwell B	73	73
Hardness, Vickers	136	136
Tensile Strength, Ultimate	440 MPa	63800 psi
Tensile Strength, Yield	345 MPa	50000 psi
Elongation at Break	35.8 %	35.8 %
Reduction of Area	67.9 %	67.9 %
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi
Poissons Ratio	0.290	0.290
Charpy Impact 	16.9 J	12.5 ft-lb
	@Temperature -30.0 °C	@Temperature -22.0 °F

ANEXO G. Propiedades mecánicas del vidrio.

96% Silica Glass		
Physical Properties	Metric	English
Density	2.18 g/cc	0.0788 lb/in³
Mechanical Properties	Metric	English
Knoop Microhardness	487	487
Modulus of Elasticity	68.0 GPa	9860 ksi
Modulus of Rupture	0.0480 GPa	6.96 ksi
Poissons Ratio	0.190	0.190
Shear Modulus	28.0 GPa	4060 ksi

Fuente (anexos F y G): www.matweb.com